

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

NYKYAIKAINEN ITÄMEREN ALUEEN PINTATAISTELUALUKSEN VALVONTATUTKA

Kandidaatin tutkielma

Kadettiylikersantti
Markus Niemi

82. merikadettikurssi
Merivartio-opintosuunta

Maaliskuu 2015

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi 82. merikadettikurssi	Opintosuunta Merivartio-opintosuunta
Tekijä Kadettiylikersantti Markus Niemi	
Tutkielman nimi NYKYAIKAINEN ITÄMEREN ALUEEN PINTATAISTELUALUKSEN VALVONTATUTKA	
Oppiaine johon työ liittyy Sotateknikka	Säilytyspaikka MPKK:n kurssikirjasto
Aika Maaliskuu 2015	Tekstisivuja 25 Liitesivuja 2
TIIVISTELMÄ <p>Pintataistelualusten sensoreiden kehitystä ovat ohjanneet muutokset alusten tehtävissä sekä toiminta- ja uhkaympäristössä. Aluksen tehokkaimman valvontasensorin, valvontatutkan suorituskyvyllä vaatimuksia asettavat mm. valvonta-alueen kasvaminen, aluskaluston määrän väheneminen, häiveteknologian yleistyminen, elektronisen häirinnän kehittyminen ja meritorjuntaohjusten nopeuden kasvaminen. Valvontatutkan suorituskyvyn kehittäminen on viime aikoina ollut yksi merivoimien aluskaluston kehittämisen painopisteistä.</p> <p>Tutkielman tarkoituksena oli selvittää pintataistelualusten valvontatutkien nykytila. Tutkimusmenetelmänä on julkisiin lähteisiin perustuva kirjallisuusselvitys. Itämeren viitekehyksestä johtuen tarkastelu on rajattu fregatteihin ja sitä pienempiin aluksiin suunnattuihin valvontatutkajärjestelmiin. Näkökulmia ovat valvontatutkien kehitys, nykyaikaisen valvontatutkan teknologia sekä saatavilla olevien järjestelmien suorituskyky.</p> <p>Tutkimuksessa todetaan, että merkittävin kehitysaskel on ollut AESA–teknologian käyttöönotto, mikä on mahdollistanut tutkan resurssien entistä joustavamman käytön. Toinen selvä kehitystrendi on järjestelmien modulaarisuus paremman skaalattavuuden, luotettavuuden ja pienempien kustannuksien saavuttamiseksi. Galliumnitridi on syrjäyttämässä galliumarsenidin vaiheohjattujen antenniryhmien puolijohdemateriaalina. Galliumnitridin käytöllä saavutetaan etuja tehossa, kaistanlaajuudessa ja luotettavuudessa. Uusien teknologioiden käyttöönottoa hidastaa kallis hinta, joten myös vanhempaa teknologiaa edustavia ja halvempia tutkia valmistetaan ja kehitetään edelleen. Saatavilla on lukuisia eri suorituskyky-, koko- ja hintaluokkaan sijoittuvia järjestelmiä.</p>	
AVAINSANAT <p>Sota-alukset, valvonta, merivalvonta, sensorit, tutkat, valvonta tutkat</p>	

NYKYAIKAINEN ITÄMEREN ALUEEN PINTATAISTELUALUKSEN VALVONTATUTKA

1.	JOHDANTO.....	1
1.1.	Aihealueen esittely	1
1.2.	Tutkimusasetelma ja rajaukset	2
1.3.	Tutkimusmenetelmä ja tärkeimmät lähteet	4
2.	TUTKA	5
2.1.	Yleistä tutkasta	5
2.2.	Toimintaperiaate.....	6
2.3.	Tutkayhtälö.....	8
3.	VALVONTATUTKAN KEHITYS	10
3.1.	Kehitystä ohjanneet tekijät	10
3.2.	Vaiheohjatut antenniryhmät	12
3.3.	Uudet materiaalit	15
3.4.	Modulaarisuus	15
4.	NYKYAIKAISET VALVONTATUTKAT.....	16
4.1.	TRS-3D	17
4.2.	Sea Giraffe AMB	18
4.3.	Naval System 100.....	19
4.4.	Kronos Naval.....	21
4.5.	TRS-4D	22
4.6.	Sea Giraffe 4A.....	23
4.7.	Järjestelmien vertailu.....	24
5.	YHTEENVETO	26

LÄHTEET

LIITTEET

NYKYAIKAINEN ITÄMEREN ALUEEN PINTATAISTELUALUKSEN VALVONTATUTKA

1. JOHDANTO

1.1. Aihealueen esittely

Merivoimat suorittaa merivalvontaa osana Suomen sotilaallista puolustamista. Rajavartiolaitos puolestaan vastaa valtakunnan merirajojen valvonnasta ja merialueen turvallisuudesta. Näiden tehtävien täyttämisen edellytyksenä on merialueen valvonnalla luotu tilannekuva. [1, s. 2] Rauhan aikana merialueen valvonnan päämääränä on valvoa meriliikennettä sellaisin järjestelyin, joilla voidaan ehkäistä, paljastaa ja tutkia alueellisen koskemattomuuden loukkaukset, estää valtakunnan sotilaallista ja yleistä turvallisuutta vaarantava toiminta sekä ehkäistä vaaratilanteiden ja onnettomuuksien syntyminen. [1, s. 2] Merisodankäynnin päämääränä on puolestaan yleensä tietyn merialueen kontrolloiminen. Merialuetta kontrolloimalla turvataan toiminnanvapaus omille joukoille ja merikuljetuksille. [2, s. 315] Meriyhteysien turvaaminen on Suomelle elintärkeää, koska valtaosa vienti- ja tuontiliikenteestämme kulkee meriteitse. Mahdollisen hyökkääjän toimintamahdollisuudet meriliikenteen sujuvuuden rajoittamiseksi ovat erittäin hyvät ja jo vaatimattomilla kauppamerenkulun saarroilla voi hyökkääjä hyödyntää vaikutusperusteista sodankäyntiä Suomen puolustuskyvyn lamauttamiseksi. [3, s. 249] Merivoimien tehtävistä lähitulevaisuudessa korostuvatkin alueellisen koskemattomuuden valvonta ja meriyhteysien turvaaminen. [4, s. 182–183]

Meriyhteyksien turvaamistehtävän korostuessa merivoimien operaatioalue tulee laajentumaan ja operaatioiden painopiste siirtymään rannikon läheisyydestä kauemmas merelle. [4, s. 182–183] Tämä tarkoittaa, että alusten rooli merialueen valvonnassa tulee korostumaan, sillä ne kykenevät liikkuvina lavetteina ulottamaan valvonnan kauemmaksi kuin rannikolle asennetut sensorit. Samalla taloudellisten resurssien vähenemisen seurauksena merivoimien kaluston määrä on kuitenkin vähentymässä [5]. Tulevaisuudessa siis yhä suurempaa merialuetta on kyettävä valvomaan pienemmällä määrällä kalustoa.

Kasvavien etäisyyksien lisäksi merialueen valvonnasta tekee haastavaa häiveteknologian kehitys ja sen käytön yleistyminen pinta- sekä ilma-aluksissa. Lisäksi aluksille suuren uhan muodostavat meritorjuntaohjukset ovat yhä nopeampia ja ketterämpiä liikkeissään. [6, s. 1] Valvonta-alueen kasvaessa myös potentiaalisten maalien määrä kasvaa. Nykyaikaisen pintataistelualuksen on siis kyettävä paitsi ulottamaan valvontakykynsä entistä kauemmas, myös havaitsemaan ja seuraamaan yhä useampia, nopeampia ja vaikeammin havaittavia maaleja. Aluksen tehokkaimman valvontasensorin, valvontatutkan suorituskyvyn kehittäminen onkin viime aikoina ollut yksi merivoimien kaluston kehittämisen painopisteistä [6, s. 2].

Tämä tutkielma selvittää pintataistelualusten valvontatutkien nykytilaa. Tutkijan motivaationa on kiinnostus käsiteltävää aihetta kohtaan. Aihe on ajankohtainen ja tärkeä myös Merivoimien vuonna 2016 alkavaan kehitysohjelmaan liittyen. Kehitysohjelmassa Merivoimat pyrkii tuottamaan suorituskykyjä vastatakseen 2020-luvun merellisiin uhkiin [5]. Tutkielman tuloksia voidaan mahdollisesti hyödyntää kehitysohjelmaan liittyviä tulevaisuuden tutkahankintoja suunniteltaessa. Vaikka tutkielmassa käsitellään taistelualuksia, voidaan samoja järjestelmiä ja siksi tutkielman tuloksia käyttää myös Rajavartiolaitoksen tarpeisiin.

1.2. Tutkimusasetelma ja rajaukset

Tutkimuksen tehtävänä on selvittää, miten toimii moderni itämeren alueen pintataistelualuksen valvontatutka, millainen on sen suorituskyky ja millaisia ratkaisuja on tällä hetkellä markkinoilla itämeren alueen pintataistelualuksen valvontatutkaksi. Valvontatutkajärjestelmistä ja niiden suorituskyvystä on olemassa hajanaista tietoa useissa eri lähteissä. Tutkimuksen tavoitteena on koota osa tästä tiedosta yksiin kansiin ja luoda loogisesti jäsenneltyä ja nykyhetken tietoon perustuvaa uutta tietoa nykyaikaisista valvontatutkajärjestelmistä. Tulevaisuuden ennakkoinnin osalta tutkimus on arvioiva.

Tutkielman pääkysymys on muotoiltu: Millainen on nykyaikainen itämeren alueen pintataistelualuksen valvontatutka ja millainen on sen suorituskyky? Alakysymyksiä ovat: 1) Millaista teknologiaa nämä tutkat hyödyntävät? 2) Miten ne tulevat kehittymään lähitulevaisuudessa? 3) Mitä järjestelmiä on tällä hetkellä saatavilla ja millainen on niiden suorituskyky?

Mitä suurempi aluksen uppouma on, sitä useampia ja painavampia järjestelmiä alukseen voidaan sijoittaa. Myös valvontatutkan valinnassa yksi määräävä tekijä on siis järjestelmän paino. Koska valvontatutkia tarkastellaan Itämeren pintataistelualuksen näkökulmasta, on järjestelmien tarkastelu rajattu ohjusveneisiin, korvetteihin ja fregatteihin suunniteltuihin valvontatutkiiin. Tätä suurempia aluksia tavataan Itämerellä vain harvoin. Kokoluokkien määrittelyssä käytetään puolustusvoimien määritelmärekisteriä, jonka mukaan fregatin uppouma on noin 1500 – 4000 tonnia, korvetin uppouma noin 500 – 1500 tonnia ja ohjusveneen uppouma alle 500 tonnia [8]. Selvästi tätä pienempiin tai suurempiin aluksiin suunnitellut valvontatutkat suljetaan tutkielman ulkopuolelle. Kokoluokan rajausta tarkoittaa, että tutkielmassa keskitytään tarkastelemaan pyörivällä antennilla toteutettuja valvontatutkajärjestelmiä. Nykyaikaisissa ja etenkin ilmatorjuntaan erikoistuneissa sotaluoksissa on useisiin suuritehoisiin stationaarisiin antenneihin perustuva valvontatutka yhä tavallisempi ratkaisu. Tällaiset antennirakenteet ovat kuitenkin huomattavan kookkaita, mistä syystä perinteinen pyörivä antenni pitää kompaktina ratkaisuna pintansa markkinoilla. Tutkajärjestelmien valmistajat ovat vakuuttuneita siitä, etteivät pyörivällä antennilla varustetut valvontatutkat ole vielä tulleet kehityksessä tiensä päähän ja lähitulevaisuudessakin valtaosa aluksista tullaan varustamaan tämän tyyppisillä järjestelmillä [9].

Järjestelmien suorituskyky koostuu kokonaisuudessaan käyttö- ja toimintaperiaatteista, henkilöstöstä ja materiaalista. [10, s. 30–31] Tässä tutkielmassa tutkajärjestelmien suorituskyvyn osalta tarkastellaan vain materiaalista suorituskykyä.

Tutkielmassa käsitellään vain vuonna 2015 nykyaikaisia valvontatutkajärjestelmiä. Koska tulevaisuuden tutkimuksessa ennakkoinnilla tarkoitetaan tulevaisuutta kohti muuttuvan nykyisyyden hallintaa menneitä, nykyisyyttä ja tulevaa koskevan tiedon avulla [6, s. 5], tarkastellaan tutkimuksessa valvontatutkien kehitystä myös lähihistorian osalta.

Venäjän laivasto on jatkossakin Itämerellä läsnä ja sen taistelualusten suorituskyky tulee kasvamaan. [6, s. 107–110] Venäläisistä valvontatutkista on kuitenkin saatavilla hyvin vähän tietoa, mistä syystä tarkastelu rajataan koskemaan vain länsimaisia järjestelmiä.

1.3. Tutkimusmenetelmä ja tärkeimmät lähteet

Tutkimusmenetelmäksi on valittu kirjallisuusselvitys. Tutkielman tarkoituksena on sekä ymmärtää kohteena olevaa ilmiötä että olla kartoittava. Tästä syystä tutkielma on jaettu osiin. Tutkielman toisessa ja kolmannessa luvussa tarkastellaan tutkan toiminnan perusteita, valvontatutkan kehitystä ja sitä ohjaavia tekijöitä sekä nykyaikaisen valvontatutkan teknologiaa ja tulevaisuuden näkymiä. Toisen ja kolmannen luvun tarkoitus on vastata ensimmäiseen ja toiseen alakysymykseen, sekä pohjustaa kolmannessa luvussa tapahtuvaa eri valvontatutkajärjestelmien tarkastelua. Tutkielman viidennessä luvussa tehdään yhteenveto.

Lähteinä käytetään kirjallisuutta, julkaisuja, artikkeleita, opinnäytetöitä, tutkimuksia sekä internetlähteitä. Tutkateknologian osalta tärkeimpiä lähteitä ovat sotatekniikanlaitoksen julkaisut, Maanpuolustuskorkeakoulun opetusmateriaali ja IEEE:n (Institute of Electrical and Electronics Engineers) julkaisut. Tutkittavien järjestelmien osalta tärkein lähde on Jane's Information Groupin kirjallisuus ja tietokannat. Jane's Information Groupia pidetään puolustusvoimissa yleisesti luotettavana lähteenä [6, s. 14]. Lisäksi lähteinä käytetään paljon sotateknologiayritysten omia internet-sivuja ja esitteitä. Kaikkia lähteitä pyritään vertaamaan muiden lähteiden samaa järjestelmää käsitteleviin tietoihin. Ristiriidat lähteissä tuodaan esille tutkielmassa. Lähteitä, joiden tekijä jää epäselväksi, ei tutkielmassa käytetä.

Koska tutkielmassa käsiteltävät valvontatutkat ovat sotilaallisia järjestelmiä, on niiden todellisesta suorituskyvystä vaikeaa löytää luotettavaa tietoa. Tarkat suoritusarvot ovat usein tietoturvaluokiteltuja. Julkinen tieto on usein järjestelmävalmistajan itsensä julkaisemaa, mistä syystä se voi olla markkinointitarkoituksessa kaunisteltua tai liioiteltua. Täysin luotettavien primäärlähteiden puuttumisen vuoksi ei yksittäisiä yksityiskohtia järjestelmien suorituskyvystä tule ymmärtää absoluuttisina faktoina. Huolimatta tarkimman tiedon puutteesta kyetään eri järjestelmien suorituskykyä vertailemaan yleisellä tasolla. On myös huomioitava, että kaikki valvontatutkat noudattavat samoja fysiikan lakeja, jolloin tiettyjen tiedettyjen parametrien perusteella voidaan tutkan suorituskykyä luotettavasti arvioida. Turvaluokiteltujen lähteiden pois jättämisen takia tutkielma on myös voitu pitää julkisena, mikä lisää tulosten käytettävyyttä.

2. TUTKA

2.1. Yleistä tutkasta

Radar (Radio Detection And Ranging) eli tutka on sensori, joka sähkömagneettista säteilyä hyödyntäen havainnoi ympäröivää maailmaa. Tutkan tärkeimpiä tehtäviä ovat maalin olemassaolon ilmaiseminen, sen suunnan ja etäisyyden määrittäminen sekä nopeuden arvioiminen. [11, s. 173] Maalien havaitsemisen lisäksi tutkaa voidaan käyttää esimerkiksi oman paikan määrittämiseen tai kohteen omatunnistejärjestelmän lähteen aktivointiin ja vastaanottoon [12, s. 17]

Tutkat voidaan jaotella esimerkiksi toimintaperiaatteen, antennin ohjauksen, lähettimen ja vastaanottimen sijainnin tai käyttötarkoituksen perusteella. Eri toimintaperiaatteella toimivia tutkia ovat esimerkiksi pulssitutka ja jatkuvantaajuuden tutka. Pulssitutka lähettää yksittäisiä tutkapulsseja ja laskee maalin etäisyyttä niiden kulkuajan perusteella. Jatkuvantaajuudentutka puolestaan lähettää jatkuvaa lähetettä ja maalin etäisyys saadaan moduloimalla lähetettä. Antennin ohjauksen perusteella tutkat voidaan jakaa mekaanisesti ja elektronisesti keilaaviin tutkiin. Mekaanisesti keilaava tutka suuntaa lähetettävän tehon haluttuun suuntaan kääntämällä tutkan antennia ja elektronisesti keilaavassa tutkassa lähetystehon suuntaus on toteutettu elektronisesti vaiheohjattujen antenniryhmien avulla. Lähettimen ja vastaanottimen, eli tutkan antennien sijainnin perusteella tutkat jaetaan mono-, bi- ja multistaattisiin tutkiin. Monostaattisessa tutkassa lähetin ja vastaanotin sijaitsevat samassa paikassa. Bistaattisessa, eli kaksipaikkatutkassa lähetin ja vastaanotin on sijoitettu eri paikkoihin. Multistaattisessa tutkassa tällaisia erilleen sijoitettuja antennia on useita. [11, s. 173–174, 234, 237] Aluslavetille asennettu tutka käsitetään aina monostaattiseksi, vaikka antennit olisikin sijoitettu aluksella eri paikkoihin. [13, s. 5–6]

Käyttötarkoituksen perusteella sotilastutkat jaetaan esimerkiksi navigointi-, tulenjohto-, seuranta-, ennakkovaroitus- ja valvontatutkiin. [11, s. 174] Aluksen valvontatutkan tehtävänä on valvoa laajaa ilmatilaa tai merialuetta aluksen ympärillä ja antaa maali-ilmaisuja jopa satojen kilometrien päästä. [7, s. 9] Nykyaikaisilla valvontatutkillla voidaan ilma- ja pintavalvonnan lisäksi suorittaa myös muita toimintoja, mistä syystä niitä usein kutsutaankin monitoimitutkiksi. [11, s. 65, 214]

Valvontatutkan taajuusalue on yleensä valittu E – H alueelta. Matalampia D-alueen taajuuksia käytetään yleensä ennakkovaroitus- tai kaukovalvontatutkissa ja korkeampia I-alueen taajuuksia seuranta- ja tulenjohtotutkissa. Taajuusalueet on esitetty liitteessä 1. Tässä tutkielmassa käytetään taajuusalueiden NATO määritelmiä. Matalammilla taajuuksilla päästään pidempiin mittausetäisyyksiin, koska taajuuden kasvaessa ilmakehän vaimentavat tekijät kasvavat. Korkeammalla taajuudella puolestaan saavutetaan parempi nopeus- ja kulmaresoluutio, suurempi antennivahvistus kapealla keilalla ja parempi sivukeilatase. [11, s. 183, 204, 209] Valvontatutkan taajuusalue on kompromissi näiden tekijöiden suhteen. Valvontatutkan taajuus on valittava aluksen merenkulikututkien käyttämän taajuusalueen ulkopuolelta, jotta järjestelmät eivät aiheuta toisilleen häiriötä [7, s. 10].

2.2. Toimintaperiaate

Tutkan toiminta perustuu sähkömagneettisen säteilyn lähettämiseen ja kohteesta takaisin heijastuneen ja siroon sateilyn vastaanottamiseen. Kun lähetetyn sähkömagneettisen pulssin etenemisnopeus ilmakehässä tiedetään, saadaan kohteen etäisyys mittaamalla pulssin kulkuaika tai tähän aikaan verrannollinen taajuusero. Koska lähetetty teho suunnataan antennin avulla tiettyyn suuntaan, saadaan antennin asentotiedon perusteella myös tieto maalin suunnasta. Liikkuvan maalin nopeus arvioidaan mittaamalla dopplerilmiön aiheuttama lähetetyn ja vastaanotetun pulssin taajuusero. [12, s. 6] Tutkaa voidaan tekniikkansa osalta pitää koko taistelukentän monimutkaisimpana laitteena. Yksinkertaistettuna tutkan rakenneosiin kuuluu lähetin, vastaanotin ja antenni. [11, s. 176] Tavanomaisen pulssitutkan lohkokaavio on esitetty liitteessä 2.

Lähetin voidaan käsittää tutkan tehon ja signaalin lähteeksi. Erilaisia teholähteitä ovat esimerkiksi teho-oskillaattorivahvistimet, kulkuaaltovahvistimet ja puolijohdevahvistimet. Teho-oskillaattorivahvistimet, kuten magnetronit generoivat ja vahvistavat itse oman toimintataajuutensa eivätkä siten tarvitse erillistä pulssilähdettä. Kulkuaaltovahvistin, kuten esimerkiksi TWT (Travelling Wave Tube) eli kulkuaaltoputki puolestaan nimensä mukaisesti vain vahvistaa erillisen pulssilähteen tuottaman signaalin. Puolijohdevahvistimia ovat esimerkiksi FET-transistoreita käyttävät RF-vahvistimet. Myös puolijohdevahvistimet tarvitsevat signaalin luomiseen erillisen pulssilähteen. [11, s. 176]

Lähettimeltä suuritehoinen tutkapulssi ohjataan antenniin, joka suuntaa sen haluttuun suuntaan. Antennin heijastamaa säteilykuviota kutsutaan tutkan keilaksi. Perinteisen valvontatutkan keila on kapea atsimuuttitasossa, mutta leveä elevaatiotasossa, millä mahdollistetaan korkealla lentävien kohteiden havaitseminen yhdellä antennin pyyhkäisykierroksella. Atsimuuttitasossa valvontatutkan antennin keilanleveys on tyypillisesti noin 0,2–0,1 astetta. Kapean keilan vahvistus on leveää suurempi, eli kapealla keilalla saavutetaan parempi signaali-kohinasuhde. Lisäksi kapealla keilalla saavutetaan parempi kulmaerottelu, mikä mahdollistaa esimerkiksi lähellä toisiaan olevien maalien tunnistamisen eri maaleiksi. 3D-tutkissa käytetään maalin korkeuden mittaamiseen päällekkäisiä monikeiloja, jotka voidaan muodostaa heijastimiin kiinnitetyillä syöttöelementeillä tai vaiheohjatuilla antenniryhmillä. [11, s. 104–105, 204] Kun lähetettyjen tutkapulssien lähetyskulma horisontin suhteen tiedetään, saadaan maalin suunnan lisäksi laskettua myös maalin korkeustieto. [12, s. 15] Kaikkein moderneimmissa valvontatutkissa kyetään antennin keilaa suuntaamaan vaiheohjauksen avulla elektronisesti sekä korkeus-, eli horisontaali- että sivu-, eli atsimuuttisuunnassa.

Lähetetyn tutkapulssin heijastuessa kaikuna takaisin kohteesta se ohjataan antennilta vastaanottimeen, jonka komponenttien tehtävänä on ilmaista maalin olemassaolo. Tutkakaiun tuloaika välitetään mittauslaitteelle, joka laskee maalin etäisyyden. Antennin asennon tai antennin asennon ja lähetetyn pulssin kulmatiedon perusteella määritetään maalin suunta ja mahdollisesti myös korkeus. Tiedot ohjataan näyttölaitteeseen jossa ne yhdistyvät maalin sijainniksi. Maalin nopeus määritetään dopplertaajuuden avulla. [11, s. 176]

Tutkan eri komponenttien lisäksi sen suorituskykyyn vaikuttavat erilaiset ohjelmistot ja rajapinnat. Tutkan ohjelmistoon kuuluvat esimerkiksi erilaiset algoritmit ja mallit, joilla ohjataan tutkan digitaalista signaalinkäsittelyä [12, s. 279–280]. Tietokoneiden kehityksen myötä myös tutkien laskentateho on kasvanut merkittävästi [13, s. 401]. Tutkajärjestelmään läheisesti liittyvä rajapinta on aluksen taistelunjohtojärjestelmä. Taistelunjohtojärjestelmän tehtävänä on koota eri sensoreiden tuottama data tilannekuvaksi. [5, s. 21]

2.3. Tutkayhtälö

Tutkan teoreettista pisintä mahdollista havaintoetäisyyttä voidaan arvioida käytettävän tehon, antennivahvistuksen, vastaanottimen herkkyyden, taajuuden sekä kohteen tutkapoikkipinta-alan ja etäisyyden avulla. Matemaattisesti maalin havaintoetäisyyttä voidaan tarkastella tutkayhtälön avulla. Tutkayhtälön johtaminen on esitetty useissa alan julkaisuissa, eikä sitä siksi käsitellä tässä tutkielmassa. Tutkayhtälön mukaan monostaattisen tutkan kantama R_{max} saadaan perusmuodossa:

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot P_{r.min}}}$$

Jossa P_t on lähetysteho, G^2 antennin vahvistus, λ^2 aallonpituus, σ kohteen tutkapinta-ala ja $P_{r.min}$ pienin vastaanotettavissa oleva teho. [11, s. 179]

Yllä kuvattu yhtälö on tutkayhtälön pelkistetty malli. Havaitsemisetaisyyden tarkempaa arvioimista varten on otettava huomioon myös tutkajärjestelmästä aiheutuvat häviöt ja ilmakehän aiheuttama vaimennus. Pienin mahdollinen vastaanotettu teho riippuu tutkan kohinasuhteesta ja pienimmästä ilmaisuun tarvittavasta signaali-kohinasuhteesta. Kohinasuhteeseen vaikuttavat esimerkiksi antennin, siirtoteiden ja muiden tutkajärjestelmien komponenttien kohinalämpötila. [11, s. 180] Ottamalla huomioon myös nämä muuttujat tutkayhtälön käännettyssä perusmuodossa saadaan tutkan maksimikantama muotoon:

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \tau \cdot \sigma \cdot L_{sys} \cdot L_{atm}}{(4\pi)^3 \cdot k \cdot T_{sys} \cdot SNR_{min}}}$$

Jossa τ on tutkapulssin pituus, L_{sys} tutkajärjestelmän häviöt, L_{atm} ilmakehän aiheuttama vaimennus, k boltzmannin vakio, T_{sys} järjestelmän kohinalämpötila ja SNR_{min} pienin ilmaisuun vaadittava signaali-kohinasuhde. [11, s. 181]

Tutkan suorituskyvyn kehittämisessä yksi keskeisimmistä tavoitteista on ollut tutkan kantaman kasvattaminen. Tutkayhtälöstä näemme, että tutkan mittausetäisyyttä voidaan kasvattaa lisäämällä tutkan lähetystehoa, antennivahvistusta ja pulssinpituutta tai vähentämällä järjestelmän häviöitä, kohinalämpötilaa ja pienintä sallittua signaali-kohinasuhdetta. Mikään näistä menetelmistä ei kuitenkaan ole täysin ongelmaton. Lähetystehon kasvattaminen lisää etäisyyttä, jolta tutka voidaan havaita. Tehon kasvattaminen kasvattaa myös lähetyskomponenttien kokoa sekä järjestelmän tarvitsemaa sähkö- ja jäähdytystehoa. Tutkapulssia pidentämällä etäisyysresoluutio kasvaa ja tutkan pyyhkäisytaajuus hidastuu. Häviöttömämpien komponenttien käyttö puolestaan lisää valmistuskustannuksia. [11, s. 181–183]

Määritettäessä maalin havaintoetäisyyttä tutkayhtälön avulla on huomioitava, että tutkayhtälö on vain teoreettinen malli. Tutkan todelliseen mittausetäisyyteen vaikuttavat merkittävästi esimerkiksi antennikorkeus, merenkäynti, sääolosuhteet, havaittavan kohteen korkeus ja tutkapoikkipinta-ala sekä ELSO-ympäristö. Vaikka nämä tekijät vakioitaisiin, rajoittaa tutkayhtälön käytettävyyttä arvioinnin kohteena olevien järjestelmien parametrien saatavuus. [7, s. 22–23] Tästä syystä tutkayhtälöä ei käytetä tutkielmassa tarkasteltavien järjestelmien vertailuun.

3. VALVONTATUTKAN KEHITYS

Tämä luku vastaa tutkimusasetelman ensimmäiseen ja toiseen alakysymykseen:

- Millaista teknologiaa nykyaikaiset valvontatutka hyödyntävät?
- Miten pintataistelualusten valvontatutkat tulevat kehittymään lähitulevaisuudessa?

Luvussa käsitellään ensin valvontatutkan kehitystä ja sitä ohjanneita tekijöitä yleisesti. Tämän jälkeen tarkastellaan tarkemmin joitakin merkittäviä kehitysaskelaita ja -trendejä.

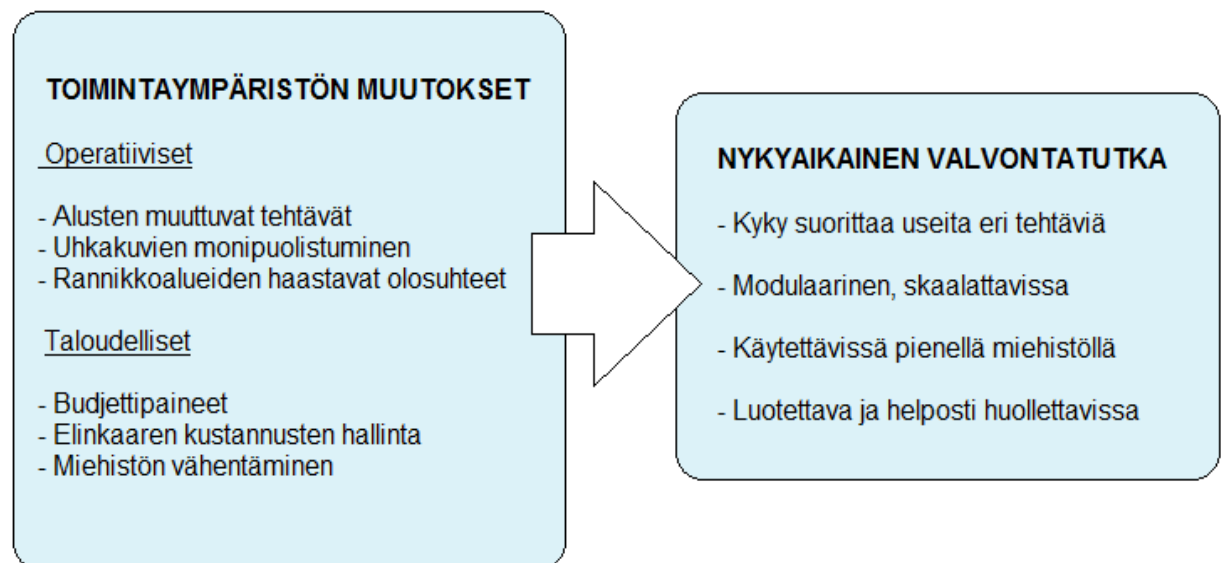
3.1. Kehitystä ohjaavat tekijät

Pinta-alusten valvontatutkien kehitystä ovat viime vuosikymmenten aikana ohjanneet useat eri tekijät. Uhkakuvat ja niiden myötä myös tutkalle asetetut operatiiviset vaatimukset ovat muuttuneet. Merivoimien operaatiot ovat maailmanlaajuisesti siirtyneet valtameriltä lähemmäs rannikoita. On jouduttu omaksumaan uusia tehtäviä, kuten terrorismin-, merirosvouksen ja muiden asymmetristen uhkien torjunta. Toisaalta myös vanhat uhkakuvat ovat yhä olemassa. Esimerkiksi aluksille perinteisesti suuren uhan muodostavat meritorjuntaohjukset ovat yhä suorituskykyisempiä ja vaikeampia havaita. [5, s. 1; 13]

Toimintaympäristön muutos tarkoittaa, että nykyaikaisen valvontatutkan on kyettävä havaitsemaan sekä seuraamaan yhdenaikaisesti monia erilaisia pinta- ja ilmamaaleja. Sen on erotettava vaikeissakin olosuhteissa saarten sekä maa-alueiden lähistössä hitaasti liikkuvia pieniä maaleja, kuten vihollisen miehittämättömiä lennokkeja, pinnassa kelluvia ajomiinoja tai laittomasti maahan pyrkivien siirtolaisten pieniä moottoriveneitä. Pienen ja hitaan maalin erottaminen välikkeen aiheuttamien virhemaalien seasta vaatii tutkalta hyvää dopplerresoluutiota eli nopeuserottelukykä ja signaali-kohinasuhdetta [11, s. 415]. Hitaasti liikkuvien maalien lisäksi nykyaikaisen valvontatutkan on kyettävä havaitsemaan sekä seuraamaan erittäin nopeita ja yhä pienemmän tutkapinta-alan omaavia kohteita, kuten vihollisen ilma-aluksia sekä meritorjunta-, ilmasta-maahan- ja jopa ballistisia ohjuksia. Ohjukset myös kykenevät lentonsa aikana yhä suuremmalla kiihtyvyydellä tehtyihin manöövereihin. [14] Ohjusten kasvaneen nopeuden vuoksi on aluksen ehtiäkseen aloittaa vastatoimet, havaittava ohjus mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. [7, s. 37]

Nopean ja ketterän maalin aikaisen havaitsemisen ja reaaliaikaisen seurannan mahdollistamiseksi on tutkan päivitysvälin oltava lyhyt. [14] Toisaalta halutaan myös maalin pitkä valaisu, koska sillä saavutetaan parempi nopeuserottelukyky ja signaali-kohinasuhde. Pidempi valaisu saavutetaan pidentämällä tutkapulssia tai lähettämällä useampia pulsseja aikayksikköä kohden. Pidemmän tai useamman pulssin lähettämiseen kuluu kuitenkin pidempi aika, joten antennin pyörimisnopeuden on oltava hitaampi. Hitaampi pyörimisnopeus puolestaan johtaa pidempään päivitysväliin [11, s. 182–183], minkä vuoksi perinteisellä pyörivällä antennilla varustetulla valvontatutkalla ei ole voitu samanaikaisesti saavuttaa pitkää valaisuaikaa ja lyhyttä päivitysväliä. Tämä ristiriita on ollut yksi merkittävimmistä nykyaikaisen valvontatutkan kehityksen ajureista. [14]

Operatiivisten vaatimusten rinnalla toinen valvontatutkajärjestelmien kehitystä vahvasti ohjannut tekijä on taloudellinen. Merivoimien budjettiin kohdistuu yhä suurempia paineita. Järjestelmien halutaan olevan kustannustehokkaita ja helppoja integroida osaksi laajempaa järjestelmäkokonaisuutta. Tämä pyritään mahdollistamaan esimerkiksi modulaarisuudella ja monitoimisuudella. Useiden erikoistutkien toiminnot pyritään saavuttamaan yhdellä monitoimitutkalla. Modulaarisuudella pyritään hallitsemaan järjestelmien kehitys- ja valmistuskustannuksia. Asiakkaan näkökulmasta järjestelmän tulee olla kustannustehokas koko sen elinkaaren ajan. Sen tulee olla luotettava, käytettävissä mahdollisimman pienellä miehistöllä sekä helposti huollettavissa. [9] Valvontatutkan kehitystä ja siihen vaikuttaneita tekijöitä on havainnollistettu kuvassa 1.



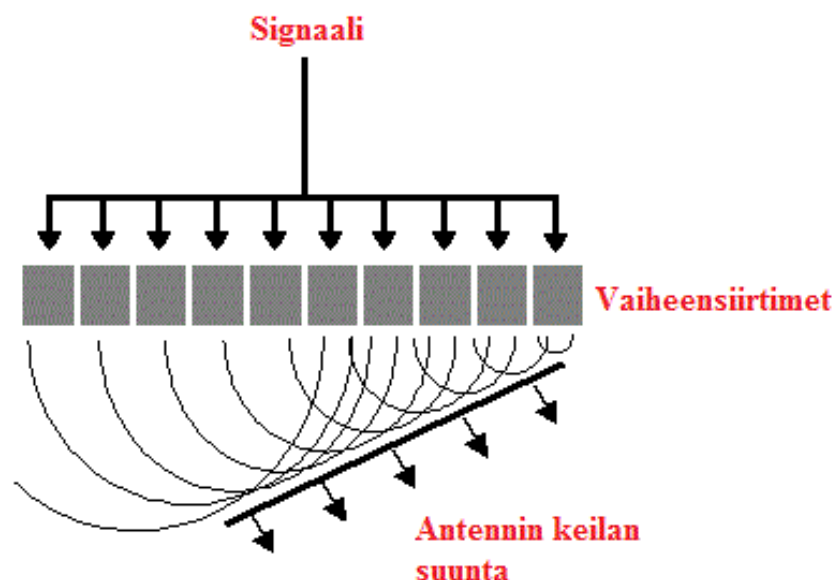
Kuva 1. Toimintaympäristön muutosten vaikutus valvontatutkan kehitykseen

3.2. Vaiheohjatut antenniryhmät

Vaiheohjatun antenniryhmän toiminta perustuu useiden eri antennimoduulien lähettämien signaalien vaihe-eroihin. Eri vaiheessa olevat signaalit interferoivat keskenään suunnaten antennin keilan tiettyyn suuntaan. Antennimoduulien vaiheensiirtoa kontrolloidaan elektronisesti ja siten tutkan keilaa siirretään paikasta toiseen nopeasti antennia fyysisesti liikuttamatta. [15] Vaiheohjatun antenniryhmän toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2.

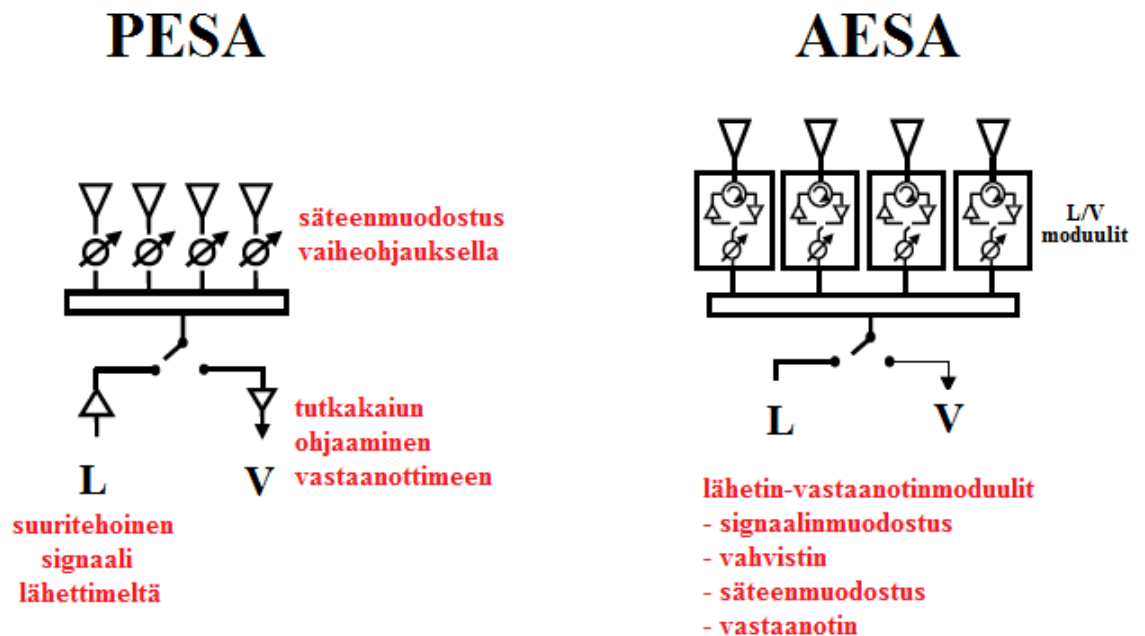
Vaiheohjattu antenniryhmä kehitettiin 1950-luvulla [13] ja myös sota-aluksissa teknologia on ollut käytössä jo pitkään. Esimerkiksi Yhdysvaltain laivasto otti vuonna 1983 Ticonderoga-luokan risteilijässään käyttöön SPY-1A valvontatutkan, jonka neljä stationaarista antennipaneelia perustuivat vaiheohjattuihin antenniryhmiin. [16] Nykyaikana lähes kaikki uudet valvontatutkat hyödyntävät antenneissaan vaiheohjausta.

Elektronisesti vaiheohjattu antenniryhmä voi olla toteutettu PESA (Passive Electronically Scanned Array) tai AESA (Active Electronically Scanned Array) –teknologialla. PESA-tutkassa kulkuaaltoputken tai vastaavan teholähteen muodostama korkeatehoinen signaali jaetaan antenniryhmässä monille eri antennimoduuleille, joiden lähettämään signaaliin saadaan aikaiseksi vaihe-ero käyttämällä vaiheensiirtimiä tai viivästyttämällä signaalin lähetystä viivästysyksiköillä. [17]



Kuva 2. Vaiheohjatun antennin toimintaperiaate

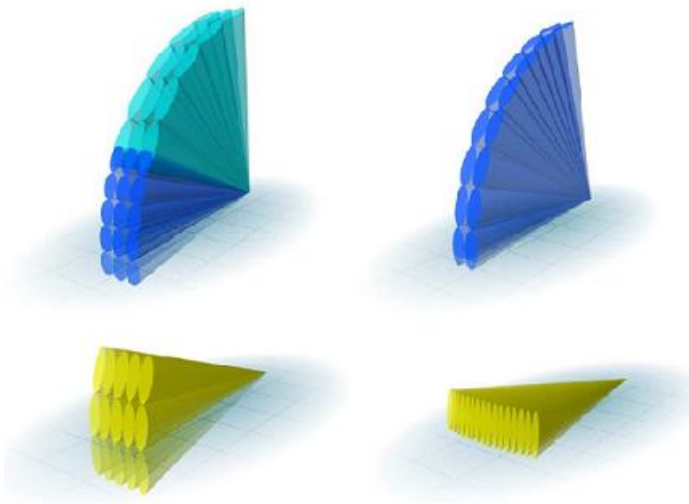
Puolijohdetekniikan ja mikroelektronikan kehityksen myötä esitelty AESA-tutka on seuraava kehitysaskel vaiheohjattujen antenniryhmien saralla. AESA-tutka perustuu suureen määrään pienikokoisia itsenäisiä lähetin-vastaanotinmoduuleita (TRM = Transmit/Receive Module). AESA-tutkan jokaisessa TR-moduulissa on integroitu teholähde, lähetin ja vastaanotin yhdeksi kokonaisuudeksi. Tuottaakseen suuritehoisen signaalin AESA-tutka ei tarvitse erillistä keskitettyä teholähdettä. Jokainen TR-moduuli toimii kuin pieni itsenäinen tutka, ja tutkan huipputeho voidaan käsittää TR-moduulien yhteenlaskettuna tehona. Jokainen moduuli voi lähettää eri taajuudella ja parametreilla. Tämän ansiosta AESA-tutkan lähetyksessä voidaan käyttää laajempaa taajuusaluetta ja muodostaa samanaikaisesti useampia keiloja. [14] PESA- ja AESA-tutkan rakenteellinen ero on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. PESA- ja AESA-tutkien rakenteellinen ero

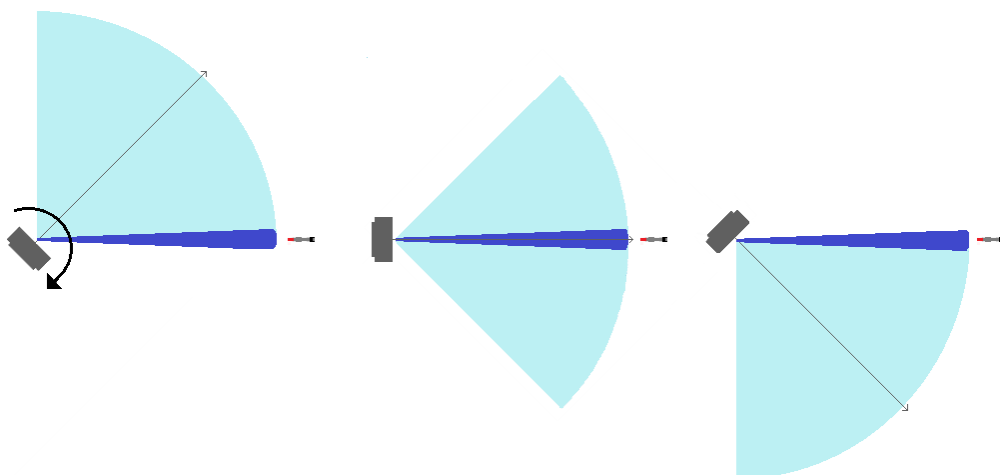
Koska AESA-tutka voi jakaa lähettämänsä tehon laajalle taajuusalueelle, on yksittäisten signaalien erottaminen taustakohinasta vaikeaa. Tämä tarkoittaa sitä, että tutka voi lähettää suurella teholla tulematta kuitenkaan itse havaituksi. Joustavan lähetteenmuokkaamisen ansiosta tutkaa voidaan mahdollisesti käyttää myös hyökkäyksellisesti häiritsemään vihollisen järjestelmiä. [18] Koska tutkan lähettämän signaalin muodostavat yhden teholähteen sijasta useat itsenäisesti toimivat TR-moduulit, saavutetaan teknologialla etua myös luotettavuudessa. Jopa 5 % TR-moduuleista voi mennä epäkuntoon tai vaurioitua ilman, että tutkan toiminta merkittävästi häiriintyy. [19, s. 8]

AESA-tekniikan myötä sekä elevaatio- että azimuuttitasossa tapahtuva elektroninen keilansiirto on mahdollista myös pyörivissä tutka-antenneissa. Ominaisuudesta käytetään nimitystä Dual-axis multi-beam tai 2D multi-beam eli suomeksi esimerkiksi 2D-monikeila. Tällaisessa tutkassa myös horisontin valvontaan voidaan käyttää useita vierekkäisiä keiloja (kuva 4). Koska TR-moduulien lähettämä taajuus ja muut parametrit ovat yksilöllisesti muokattavissa, voidaan jokainen keila lisäksi optimoida havaitsemaan erilaisia kohteita. [20]



Kuva 4. Esimerkki antennin monikeilauksesta [20]

2D-monikeilaus vähentää huomattavasti pyörivän antennin perussynnin, hitausmomentista aiheutuvien rajoitteiden vaikutusta keilan azimuuttitason suuntauksessa. Yhden antennin pyyhkäisykierroksen aikana kyetään samaa maalia valaisemaan useita kertoja (kuva 5). Tällöin samalla antennin pyörimisnopeudella saavutetaan sekä lyhyempi päivitysväli että pidempi maalin valaisu [20], mikä tarkoittaa mm. pidempää havaitsemisetaisyttä, parempaa dopplerresoluutiota ja tarkempaa seuranta. Perinteisellä antennilla tätä ei voida saavuttaa ilman, että tutkan toimintamoodia vaihdetaan.



Kuva 5. Maalin valaisu useasti yhden antennin pyyhkäisykierroksen aikana [20]

3.3. Uudet materiaalit

AESA-tutkien TR-moduulien vahvistimissa käytetään kahta eri puolijohdemateriaalia. Kauemmin käytössä ollut ja yleisemmin käytetty materiaali on galliumarsenidi (GaAs). Uudempi materiaali, jota käytetään toistaiseksi vielä harvassa pinta-aluksen valvontatutkassa, on galliumnitridi (GaN). Galliumnitridin käytöllä saavutetaan etua esimerkiksi tehossa, kaistanlaajuudessa ja luotettavuudessa. Merkittävämpänä tekijänä on materiaalin jopa viisinkertainen tehoiheys galliumarsenidiin verrattuna. Tämä tarkoittaa, että samankokoisesta vahvistimesta saadaan irti huomattavasti enemmän tehoa. Toisaalta tehon lisääntyessä energian- ja jäähdytyksen tarve kasvaa. Aluksilla tutkajärjestelmän vaatiman energian ja jäähdytyksen tuottaminen ei kuitenkaan yleensä tuota ongelmia ja tehoa kasvatettaessa haasteet lämmönsäätelyssä kohdistuvat lähinnä antennirakenteeseen. [21]

Toistaiseksi galliumnitridin käyttöä rajoittaa vielä materiaalin kallis hinta. Sen käyttö elektroniikan sovelluksissa kuitenkin lisääntyy jatkuvasti, mikä laskee materiaalin hintaa ja tekee sen käytöstä taloudellisesti kannattavaa myös matalan volyymin sotateollisuuden tuotteissa. [9] Jo lähitulevaisuudessa kaikki valmistajat ovat todennäköisesti siirtyneet käyttämään galliumnitridiä valvontatutkiensa puolijohdemateriaalina.

3.4. Modulaarisuus

Mekaanisesti keilaavat tutkat ovat perinteisesti olleet hyvin yksilöllisiä tiettyä tehtävää varten räätälöityjä järjestelmiä ja esimerkiksi tutkan käyttämä taajuus tai antennin suunnattavuus on ollut tarkkaan määrätty. Mahdollisuus käyttää samoja komponentteja useissa eri järjestelmissä on ollut hyvin rajoitettu. AESA-arkkitehtuuri on mahdollistanut tutkien suuremman modulaarisuuden. Samoja peruskomponentteja voidaan käyttää useissa eri järjestelmissä ja tutkan osia tai toimintoja vaihtaa toisiin ilman, että tarvitsee kehittää tai valmistaa kokonaan uutta järjestelmää. Valmistajat voivat esimerkiksi käyttää samoja TR-moduuleja sekä hävittäjätutkissa että pinta-aluksen valvontatutkissa. Tämä vähentää suunnittelu- ja valmistuskustannuksia sekä mahdollistaa yksinkertaisemman logistiikan varaosien osalta. Lisäksi modulaarisuus mahdollistaa järjestelmien paremman skaalattavuuden esimerkiksi lisäämällä tai vähentämällä antennin TR-moduulien määrää. Suuremmalla määrällä moduuleja saavutetaan parempi suorituskyky. Pienempi moduulien määrä puolestaan tarkoittaa pienempää kokoa, painoa ja energiantarvetta sekä alhaisempaa hintaa. Näin yksi järjestelmä voidaan sovittaa vastaamaan usean eri asiakkaan vaatimuksia. [21]

4. NYKYAIKAISET VALVONTATUTKAT

Tämä luku vastaa tutkimusasetelman toiseen alakysymykseen: Mitä järjestelmiä on tällä hetkellä saatavilla ja millainen on niiden suorituskyky? Luvussa on valittu tarkasteluun kuusi valvontatutkajärjestelmää. Tarkastelu on otanta markkinoilla olevista järjestelmistä. Valinnassa on suosittu sellaisia suuria tutkavalmistajia, joiden valvontatutkia on ennestään käytössä Itämeren alueen merivoimien aluksissa. Tutkimusasetelman mukaisesti tarkasteluun on valittu vain vuonna 2015 markkinoilla olevia nykyaikaisia ja Itämeren alueen pintataistelualukseen sopivia järjestelmiä. Tällöin yhtenä valintakriteerinä on ollut järjestelmän kohtuullinen koko ja paino.

Tarkastelussa on kiinnitetty huomiota tutkan tekniseen rakenteeseen, taajuuteen, kantamaan, pienimpään mahdolliseen maalin havaitsemisetaisytyteen, antennin keilan suunnattavuuteen, antennin pyörimisnopeuteen, päivitysväliin, antennin ja muiden järjestelmän osien painoon sekä huoltoväleihin. Tietojen ilmoittaminen vaihtelee eri tutkavalmistajien välillä. Mikäli jotain tietoa ei ole ollut saatavilla, on se merkitty n/a (not available).

Koska tutkajärjestelmien tarkastelu perustuu yksinomaan julkisiin tietoihin, ei tutkien suorituskyvyn määrittäminen todellisen tarkasti esimerkiksi tutkayhtälön avulla ole mahdollista. Kaikkia tarvittavia parametreja ei ole saatavilla ja esimerkiksi järjestelmien häviöiden määrittämiseksi olisi tehtävä järjestelmäkohtaisia mittauksia. [7, s. 11; 10, s. 186–187] Tutkat toimivat kuitenkin samoissa ilmakehän olosuhteissa ja noudattavat samoja fysiikan perusperiaatteita, joten tiettyjä johtopäätöksiä järjestelmien ominaisuuksista ja suorituskyvystä kyetään muodostamaan.

4.1. TRS-3D

TRS-3D on Airbus Defence and Space:n valmistama monitoimitutka. Tutka on tarkoitettu ilma- ja pintatilannekuvan luomiseen ja ylläpitoon, mutta sitä voidaan käyttää myös tulenjohtoon. TRS-3D tutkan eri versioita on toimitettu eri maiden merivoimille ja merivartiostoille yli 60 yksikköä. Itämeren alueella tutka on käytössä esimerkiksi Suomen, Saksan, Norjan ja Tanskan merivoimilla. [9]

G-alueella toimivan tutkan kantama on 200km. Tutkassa on PESA tekniikalla toteutettu hybridiantenni. Atsimuuttitaso keilataan mekaanisesti ja elevaatiotaso elektronisesti vaiheohjauksella. Perusmallin antennissa vaiheohjattuja antennirivejä on 16 kappaletta, jossa kussakin on 46 elementtiä. Antennin pyörintänopeus riippuu valitusta moodista maksimin ollessa 60 rpm. Keilan maksimi elevaatiokulma on 70 astetta. Seurannassa voi olla kerrallaan 400 ilma- tai pintamaalia. Tutkan suunnittelussa on valmistajan mukaan otettu erityisesti huomioon saariston ja rannikkoalueiden olosuhteet. Laivatykistön tulenjohdossa voidaan käyttää hyödyksi tutkan kykyä havaita ammusten iskemiä. Tutka tunnistaa elektronisen häirinnän ja kykenee toimimaan häirityissä olosuhteissa. [22]

TRS-3D tutkasta on olemassa useampi eri versio. Antennin vakautus voidaan toteuttaa joko mekaanisesti tai elektronisesti ja antennin lähetin-vastaanotinrivien lukumääräksi voidaan valita 16 tai 32. Elektronisesti vakautettu antenni on kevyempi mutta myös kalliimpi. 32 lähetinvastaanotinrivillä varustettu antenni on suunnattu korvetti- ja fregatti-kokoluokan aluksiin. Lisäämällä lähetin-vastaanotinrivien lukumäärää saavutaan parempi suorituskyky, mutta samalla antennin koko ja paino kasvaa. Tutkan mallinimi kertoo, mikä versio on kyseessä. Hamina- ja Hämeenmaa-luokan aluksiin asennettu, erityisesti pieniin aluksiin suunnattu versio on mallinimeltään TRS-3D/16-ES, jossa numero 16 kertoo lähetin-vastaanotinrivien lukumäärän ja kirjaimet ES antennin olevan elektronisesti vakautettu (Electronic Stabilization). TRS-3D/32 mallia käyttää esimerkiksi Saksan merivoimat Bremen-luokan fregateissa ja Braunschweig-luokan korveteissa. [22]

TRS-3D/16-ES mallin antenni (kuva 6) painaa 575 kilogrammaa ja kannen alle sijoitettava elektroniikka 2075 kilogrammaa. Tutkassa on integroitu IFF (Identification Friend-or-Foe) omatunnistusjärjestelmän antenni. Optiona tutka voidaan varustaa lisäksi navigointiin käytettävällä I-alueen antennilla. Teholähteenä tutkassa käytetään kulkuaaltoputkea. [22]



Kuva 6. TRS-3D/16-ES monitoimitutkan antenni [22]

4.2. Sea Giraffe AMB

Sea Giraffe AMB on kompakti PESA-teknologiaan perustuva monitoimitutka. Tutka on tarkoitettu ilma- ja pintatilannekuvan luomiseen ja ylläpitämiseen sekä maalinosoitukseen. Optiona valittavia ominaisuuksia ovat epäsuoran tulen ennakkovaroitus sekä ampuvan yksikön paikantaminen, navigointikyky erillisen lisäantennin avulla, IFF-järjestelmä ja Dual-TWT teholähde. Tutkan lähettämä taajuus on 5.4-5.9 GHz eli se toimii G-alueella. Tutkan kantama on 180 km. [24] Suurin lähetysteho on 25 KW ja antennin keilanleveys 2,1 astetta [25] Keilan maksimi elevaatiokulma on 70 astetta ja antennin pyörintänopeus 30 tai 60 rpm käytetystä moodista riippuen. Esimerkiksi valvontamoodissa antennin pyörintänopeus on 30 rpm ja epäsuoran tulen ennakkovaroitusmoodissa 60 rpm. [24; 26]

AMB tutka kykenee seuraamaan samanaikaisesti 600 maalia, joista 200 voi olla ilma- ja 400 pintamaaleja. Tutka kykenee toimimaan häirinnän alaisena sekä paikantamaan häirintälähteen lähteen. Automaattinen maalin tunnistaminen toimii sekä liikkuvaa että paikallaan leijuvaa helikopteria vastaan. Ilma- ja pintavalvonnassa tutka hyödyntää useita päällekkäisiä keiloja ja monopolssiseurantaa. Navigointimoodissa puolestaan hyödynnetään lyhyttä kompressoimatonta pulssia. Ammuksen lentoradan laskemisen lisäksi järjestelmä kykenee valmistajan mukaan määrittämään havaitun ammuksen tyyppin. Tutka voi antaa maalitietoa useille eri lyhyen matkan ja enintään kymmenelle keskipitkänmatkan SAM (Surface-to-Air Missile) ohjuksyksikölle. [24; 26]

Sea Giraffe AMB:n antenni (Kuva 7.) voidaan optiona varustaa taajuusselektiivisellä radomilla, joka pienentää antennin tutkapoikkipinta-alaa ja lämpöherätettä. Radomin katolle on mahdollista asentaa muita sensoreita. [24] Ruotsin merivoimien Visby-luokassa on aluksen häiveominaisuuksien parantamiseksi antenni sijoitettu tällaisen radomin sisään. [25] Antenni painaa noin 650 kg ja järjestelmän muut osat noin 1100 kg. Taajuusselektiivisen radomin paino on noin 250 kg. [27] Valmistajan mukaan tutkan MTBF on 1000 tuntia ja MTBCF 2000 tuntia. Itämeren alueella tutka on Visby-luokan lisäksi käytössä Puolan merivoimien Orkan-luokan ohjusveneissä. AMB sai hiljattain mallinimellä AN/SPS77 tyyppihyväksynnän Yhdysvaltain laivastoon, joka käyttää sitä Independence-luokan LCS (Littoral Combat Ship) aluksissaan. [9]



Kuva 7. Vasemmalla SG AMB antenni [25] Oikealla HMS Visby [24]

4.3. Naval System 100

Naval System 100 eli NS100 on Thales Nederlandin valmistama monitoimitutka. Thales Nederland on viime vuosikymmenen aikana ottanut itselleen johtoaseman pinta-alusten keskipitkänkantaman valvontatutkien valmistajana. Sen PESA tekniikkaan pohjautuvaa SMART-S MK2 3D valvontatutkaa on myyty yli 60 yksikköä. NS100 syntyi, kun yhtiö yhdisti SMART-S MK2 valvontatutkansa perusrakenteeseen APAR ja SEA MASTER 400 pitkän kantaman tutkissa käyttämänsä AESA-teknologian. Näin vuonna 2012 Thales oli ensimmäinen valmistaja joka esitteli AESA-teknologian pyörivässä tutka-antennissa. [9] S-alueella toimivan tutkan kantama on 200 km ja maalin pienin havaitsemisetäisyys 150 m. Elektronisesti vakautettu antenni (kuva 8.) koostuu kymmenestä 64-kanavaisesta vastaanotinmoduulista ja nestejäähdytetyistä GaAS lähetinmoduuleista. Antennin pyörimisnopeus on 60 rpm. Antennin keilan maksimi elevaatiokulma on 70 astetta. Tutkan MTBCF on 3000 tuntia. [28]

Tutkan antennin lähetinmoduulien määrä voidaan skaalata asiakkaan vaatimusten mukaisesti. NS100 mallissa lähetinmoduuleja on kymmenen, NS106 mallissa kuusi ja NS103 mallissa kolme. NS100 on suunnattu fregatteihin ja korvetteihin, NS106 ohjus- ja muihin hyökkäysveneisiin ja NS103 pienempiin partio- ja apualuksiin. Tutkasta saattaa olla myöhemmin saatavilla vieläkin suorituskykyisempiä versioita, sillä Thales Nederlandin lausunnon mukaan antennin lähetinmoduulien määrää voitaisiin kasvattaa jopa viiteentoista asti. Skaalattavuuden lisäksi on tutkan antenniin suunniteltu asiakkaan toiveesta integroitavan myös muita sensoreita. Optioihin kuuluu lyhyen matkan pintavalvontaan tarkoitettu SCOUT Mk 3 jatkuvanlähetteentutka, infrapunakamera ja IFF omatunnistejärjestelmän antenni. [28] Integroimalla useita sensoreita samaan antenniin voidaan säästää tilaa ja tehdä mastorakenne yksinkertaisemmaksi. Valvontatutka pyritään aluksessa sijoittamaan tutkahorisontin vuoksi mahdollisimman korkealle, joten myös muiden sensoreiden sijoittelussa voidaan saavuttaa etuja integroimalla ne tutkan antenniin.

Alankomaiden merivoimat on tehnyt sopimuksen yhden NS100 tutkan toimittamisesta Rotterdam-luokan amfibialukseensa. Lisäksi Singapore on tilannut kuuteen uuteen alukseensa tutkan version NS106. [9]



Kuva 8. NS100 tutkan antenni [28]

4.4. Kronos Naval

Kronos Naval on SELEX ES:n valmistama monitoimitutka. Tutka on suunnattu aluksiin joiden bruttovetoisuus on 400 tonnia tai enemmän, mikä tarkoittaa noin ohjusveneen tai korvetin kokoluokkaa. Tutka toimii C-alueella ja sen maksimikantama on 250 kilometriä. Antennin keilauksen maksimi elevaatiokulma on valvontamoodissa 70 astetta ja maalinseurannassa 85 astetta. Elektronisesti antennin keilaa voidaan suunnata elevaatiotasossa 60 asteen ja atsimuuttitasossa 45 asteen sektorilla. Antennin pyörimisnopeus on 60 rpm. Maalitiedon päivitysväli on alle 1 sekunti ja samanaikaisesti seurannassa voi olla maksimissaan 300 ilma- tai pintamaalia. [29]

Kronos Naval tutkan antenni (kuva 9.) painaa 970 kilogrammaa. Antenniin on integroitu IFF ja SLB (Sidelobe blanking) antennit. Valmistajan ilmoittama MTBCF arvo on yli 2000 tuntia. [29] Kronos NV tutkajärjestelmää on JANE´sin lähteiden mukaan toistaiseksi ilmoitettu toimitettavaksi ainakin Yhdistyneiden arabiemiraattien laivaston Falaj 2-luokan ohjusveneisiin. [9]



Kuva 9. Kronos Naval tutkan antenni [29]

4.5. TRS-4D

Alkuvuodesta 2014 Airbus Defence and Space esitteli hyvin myynelle TRS-3D mallilleen seuraajan, TRS-4D:n. TRS-4D on GaN-teknologiaan perustuva AESA-monitoimitutka. Antennin (kuva 10.) keilan minimi elevaatiokulma on 2 ja maksimi 70 astetta. Atsimuuttitasossa keilaa voidaan suunnata 50 astetta. Tutkan maksimikantama on jopa 250 kilometriä ja minimi maalin havaintoetäisyys alle 100 metriä. Tutka kykenee havaitsemaan tutkapaikkipinta-alaltaan alle 0.01 m^2 kokoisia maaleja. Samanaikaisesti seurannassa voi olla 1000 pinta- tai ilmamaalia. Antennin pyörimisnopeus on 0 – 30 rpm käytetystä moodista riippuen. Tutkan operaattorin valittavissa on kolme eri toimintamoodia: valvonta-, omasuoja- ja sektorimoodi. [30] Eri toimintamoodien ominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. TRS-4D tutkan eri toimintamoodit [30]

MOODI		VALVONTA	OMASUOJA	SEKTORI
Näyttöalue		0.1 km - 200 km	0.1 km - 80 km	0.1 km - 200 km
Antennin rpm		15	30	0
Päivitysväli		Normaali	Nopea	Erittäin nopea
Keilaus	Ats.	360°	360°	50°
	Elev.	2° - 70°	2° - 70°	2° - 70°

TRS-4D voidaan ilman sen perusrakenteen muuttamista skaalata asiakkaan vaatimusten mukaiseksi. Jatkuvan 360 asteen elektronisen keilauksen mahdollistamiseksi voidaan järjestelmä yhden pyörivän antennin sijasta varustaa neljällä kiinteällä antennipaneelilla (kuva 10). Tällöin tutkan mallinimi on TRS-4DNR (Non-Rotating). TRS-4D Tutkan pyörivä antenni painaa n. 900 kilogrammaa. Järjestelmän muiden komponenttien painoa ei ole ilmoitettu. Valmistajan mukaan järjestelmä on kuitenkin kokonaisuutena kevyempi kuin edeltäjänsä TRS-3D, mistä voimme päätellä järjestelmän muiden komponenttien yhteispainon olevan alle 1750 kilogrammaa. Tutkassa on integroitu IFF-antenni. MTBCF on 3000 tuntia. [30]



Kuva 10: Vasemmalla TRS-4D ja oikealla TRS-4DNR antennit [30]

Airbus Defence and Space on tehnyt jo ainakin kaksi sopimusta TRS-4D:n eri versioiden toimittamiseksi. Pyörivällä antennilla toteutettu versio tullaan vuodesta 2015 alkaen asentamaan Yhdysvaltain laivaston Freedom-luokan LCS-aluksiin. Saksan merivoimat on puolestaan tilannut F125-luokan fregatteihinsa version TRS-4DNR. [9]

4.6. Sea Giraffe 4A

4A on Saabgroupin Sea Giraffe mallisarjan uusin ja suorituskykyisin tutkamalli. Tutka toimii S-alueella. Tutkassa käytetään osittain samoja komponentteja kuin mallisarjan AMB mallissa. Antennirakenteeltaan nämä kaksi sisärjestelmää kuitenkin poikkeavat toisistaan merkittävästi. AMB mallin kevyt PESA hybridiantenni keilaa atsimuuttitason mekaanisesti ja elevaatiotason monikeilalla, kun taas 4A mallissa on suurikokoinen AESA-antenni. Tutkan maksimikantama on jopa 350 km, mikä on lähes kaksi kertaa suurempi kuin AMB mallissa (180 km). Epäsuoran tulen ennakkovaroitusmoodissa maksimikantama on 100 km. GaN tekniikkaan perustuvan antennin keilan maksimi elevaatiokulma on 70 astetta ja antennin pyörintänopeus 30 tai 60 rpm valitusta moodista riippuen. Antenni voidaan TRS-4D tapaan myös pysäyttää keilaamaan vain tiettyä sektoria. Tutka kyetään seuraamaan samanaikaisesti 1000 ilma- ja 500 pintamaalia. [31]

Tutkan antenni (kuva 11.) on kooltaan 4 m². Antenni painaa noin 1700 kg ja järjestelmän muut komponentit noin 1250 kg. [27] Antenni on elektronisesti vakautettu. Tutka voidaan optiona varustaa IFF-lisäantennilla. Valmistajan mukaan saman tutkajärjestelmän maalle sijoitettavan version, Giraffe 4A:n MTBCF on yli 2500 tuntia. [32] Koska järjestelmät koostuvat pääosin samoista komponenteista, voidaan luvun olettaa pitävän hyvin lähelle paikkansa molemmissa versioissa. Erään internetlähteen mukaan Saab on sopinut toistaiseksi nimettömän asiakkaan kanssa ensimmäisen 4A tutkan toimittamisesta vuonna 2016. [33]



Kuva 11. Sea Giraffe 4A tutkan antenni [33]

4.7. Järjestelmien vertailu

Tässä aluvuussa tiivistetään vastaus tutkimuksen alakysymykseen: Millaisia järjestelmiä on tällä hetkellä saatavilla ja mikä on niiden suorituskyky? Eri järjestelmien ominaisuudet on koottu taulukkoon 2.

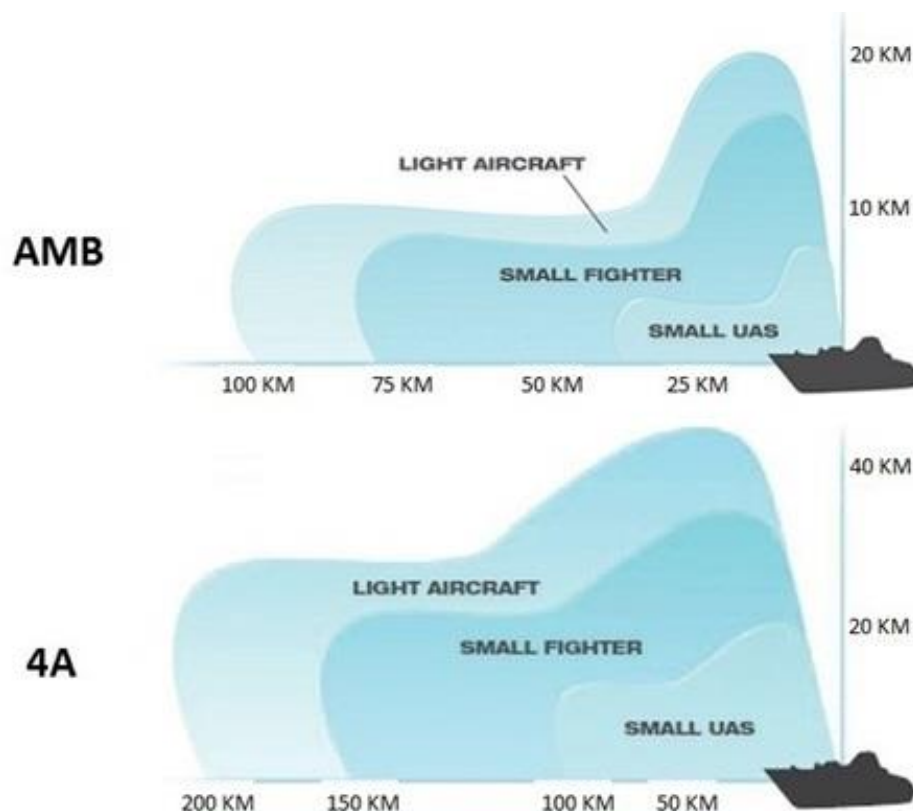
Taulukko 2. Eri valvontatutkien ominaisuuksia

TUTKA		TRS-3D	SG AMB	NS100	TRS-4D	KRONOS	SG 4A
Taajuus		G	G	E/F	G	G	E/F
Tekniikka		PESA	PESA	AESA (GaAs)	AESA (GaN)	AESA (GaAs)	AESA (GaN)
Kantama max.		180 km	180 km	200 km	200 km	250 km	350 km
Etäisyys min.		n/a	n/a	150 m	< 100 m	n/a	< 100 m
Antennin rpm		30/60	60/30	n/a	60/30/0	60	60/30/0
Päivitysväli		1 s	1 s	< 1s	< 1s	< 1s	< 1s
Keilaus	Ats.	360°	360°	360°	360°(50°)	360°	360°/50°
	Elev.	2° - 70°	2° - 70°	70°	2° - 70°	70° (85°)	70°
Paino	Antenni	575 kg	650 kg	n/a	900 kg	970 kg	1700 kg
	Muu	2075 kg	1100 kg	n/a	n/a	n/a	1250 kg
MTBCF		n/a	2000 h	3000 h	3000 h	2000 h	2500 h

Tarkastelussa olevat järjestelmät voidaan jaotella eri periaatteiden mukaisesti. Käytetyn teknologian perusteella voidaan tehdä jako PESA ja AESA-tutkien sekä edelleen GaAs ja GaN-teknologiaan perustuvien tutkien välillä. Suorituskyvyn perusteella tutkat voidaan jakaa esimerkiksi niiden kantaman mukaan. Antennin ja muiden järjestelmän osien painon perusteella tutkat voidaan jaotella sen mukaan, minkä kokoluokan aluksiin niiden asentaminen on ylipäättänsä mahdollista. Saman suorituskyky- ja kokoluokan järjestelmien välille voidaan tehdä ero esimerkiksi niiden hinnan tai luotettavuuden perusteella. Tämänkaltaisen tarkastelu osoittaa, että kaikki valitut järjestelmät eivät kilpaile samassa suorituskyky- ja kokoluokassa. Järjestelmien ominaisuuksien sekä hankintasopimuksien perusteella voidaan päätellä, että järjestelmät on suunnattu esimerkiksi:

- TRS-3D ja SG AMB ohjusveneiden kokoluokkaan,
- TRS-4D ja KRONOS korvetteihin sekä fregatteihin,
- SG 4A suurikokoisiin fregatteihin,
- NS100 skaalattavissa ohjusvene-fregatti kokoluokkaan.

Otetaan esimerkkinä tarkasteluun kaksi saman valmistajan saman malliperheen tutkamallia, Sea Giraffe AMB ja 4A. Kuvassa 12 esitetty ero järjestelmien suorituskyyssä on huomattava: 4A mallilla erilaiset kohteet havaitaan jopa kaksinkertaiselta etäisyydeltä. Lisäksi AESA-teknologia tuo mukanaan myös monia muita etuja, kuten laajemman taajuusalueen, pidemmän maalin valaisun, lyhyemmän päivitysvälin sekä paremman luotettavuuden vauriotilanteissa.



Kuva 12. Maalien havaintoetäisyyksiä Sea Giraffe AMB ja 4A valvontatutkilla [24]

Koska järjestelmän suorituskyy on kompromissi useiden eri tekijöiden välillä, ei lähes kaksinkertaista maalin havaintoetäisyyttä saavuteta ilmaiseksi. 4A mallin antenni painaa 1700 kg ja järjestelmä kokonaisuudessaan 2950 kg. AMB mallissa vastaavat arvot ovat 650kg ja 1750kg. 4A mallin antenni painaa siis peräti 262 % ja järjestelmä kokonaisuudessaan 162 % enemmän kuin AMB. Pelkästään järjestelmien painoero kertoo sen, että ne on suunnattu eri kokoluokan aluksiin. Lisäksi AESA ja GaN-teknologiaan perustuvan 4A mallin voidaan olettaa olevan huomattavasti AMB:tä kalliimpi. On myös huomioitava, että valvontatutka on yksittäisenä sensorina vain osa taistelualuksen suorituskyyä. Aikaisemmin mainittujen tekijöiden lisäksi tutkan valintaan voivat vaikuttaa aluksen muut asejärjestelmät ja sensorit sekä taistelunjohtojärjestelmä ja muut rajapinnat. Esimerkiksi Hämeenmaa-luokan järjestelmiä tarkastellessa voimme huomata, että sekä TRS-3D valvontatutka, että aluksen ANCS taistelunjohtojärjestelmä ovat saman valmistajan tuotteita.

5. YHTEENVETO

Merivoimien toimintaympäristössä on tapahtunut monia muutoksia. Merkittävin niistä on operaatioiden siirtyminen valtameriltä yhä lähemmäs rannikoita. Suomen näkökulmasta kehityskulku näyttää ensisilmäyksellä päinvastaiselta. Tulevaisuudessa merivoimien tehtävistä tulee korostumaan meriliikenteen turvaaminen, mikä siirtää operaatioita meriliikenteen kulkuväylille kauemmas rannikosta. Valvontatutkien kehityksen kannalta maailmanlaajuinen suuntaus voidaan kuitenkin nähdä meille edullisena, koska pienessä Itämeressä kaikkien operaatioiden voidaan käsittää tapahtuvan rannikon läheisyydessä. Rannikon läheisyys tarkoittaa saarten ja maa-alueiden katveiden, välkkeen, väärin maalien ja asymmetristen uhkien lisääntymistä. Tutkalta vaaditaan siis entistä pienempien ja hitaampien maalien löytämistä suuremmasta taustakohinasta. Toisaalta myös perinteiset uhkakuvat ovat yhä olemassa. Esimerkiksi aluksille suuren uhan muodostamat meritorjuntaohjukset ovat yhä nopeampia, ketterämpiä ja niiden tutkapinta-ala on pienempi.

Merkittävin yksittäinen kehitysaskel Itämeren alueen pintataistelualuksen valvontatutkan kannalta on ollut AESA-teknologian käyttöönotto. Hitaiden ja nopeiden maalien optimaalinen havaitseminen on aikaisemmin vaatinut tutkalta hyvin ristiriitaisia asetuksia. Jos aluksella on ollut vain yksi valvontatutka, on tutkan asetuksia eli moodia täytynyt vaihtaa sen mukaan, millaisia maaleja vastaan tutkalla halutaan toimia. Koska aluksiin kohdistuvat uhat ovat nykyaikana yhä monimuotoisempia ja niiden ennustaminen voi olla vaikeaa, ei tällainen ratkaisu ole kestävä. AESA-teknologia on mahdollistanut pyörivän antennin 2D-monikeilauksen ja useampien samanaikaisten keilojen muodostamisen, minkä ansiosta AESA-tutkalla voidaan samanaikaisesti suorittaa yhä useampia tehtäviä. AESA-tutkan lähetyksessä voidaan myös käyttää laajempaa taajuusaluetta, mikä ehkäisee tutkan paljastumista viholliselle. AESA-tutkan valaisua voidaan käyttää joustavasti ja dynaamisesti vain siellä, missä sitä kulloinkin tarvitaan. Modulaarisen rakenteensa vuoksi AESA-tutka on lisäksi vaurio- ja häiriötilanteissa luotettavampi kuin perinteinen tutka.

Stationaariset antennit ovat yhä tavallisempi ratkaisu uusien sota-alusten valvontatutkissa. Pyörivä antenni rajoittaa yhä keilan suunnattavuutta atsimuuttitasossa myös AESA-tutkissa. Tästä huolimatta pyörivä antenni pitää kompaktina ratkaisuna pintansa markkinoilla. Stationaaristen antennien voidaan kuitenkin olettaa yleistyvän myös pienissä aluksissa, mikäli teknologian kehitys mahdollistaa tulevaisuudessa antennien kevyemmän rakenteen ja halvemman hinnan. AESA-tutkien kalliin hinnan vuoksi myös vanhempia PESA-tutkia valmistetaan yhä ja näin tulee varmasti olemaan myös lähitulevaisuudessa. On huomioitava, että myös näiden järjestelmien suorituskykyä kehitetään edelleen.

Nykyaikaiset valvontatutkat ovat yhä modulaarisempia. Tällä tarkoitetaan samojen peruskomponenttien käyttöä useissa eri tutkajärjestelmissä. Modulaarisuudella saavutetaan säästöjä pienempien suunnittelu-, valmistus-, ja logistiikkakulujen muodossa. Lisäksi modulaarinen järjestelmäarkkitehtuuri mahdollistaa järjestelmien paremman skaalattavuuden. Sama tutkajärjestelmä voidaan komponenttien määrää muuttamalla skaalata usean eri alusluokan vaatimuksien mukaiseksi. Tutkien puolijohdemateriaalina valmistajat ovat siirtymässä galliumnitridin käyttöön. Materiaalin käyttöä rajoittaa vielä sen kalliimpi hinta, jonka kuitenkin odotetaan laskevan lähitulevaisuudessa. Galliumnitridin käytöllä saavutetaan galliumarsenidiin nähden etua luotettavuudessa, tehossa ja kaistanleveydessä.

Käytetystä teknologiasta riippumatta on nykyaikainen valvontatutka aluksen tehokkain sensori. Sen kantama on useita satoja kilometrejä, tyypillisesti 180–350 km. Tutka kykenee seuraamaan samanaikaisesti satoja tuhansia ilma- ja pintamaaleja. Tutka tunnistaa häirinnän ja kykenee toimivaan häirinnän alaisena. Tutkan lähetettä on vihollisen yhä vaikeampi havaita. Tutkan maaliseuranta on riittävän tarkka monien asejärjestelmien maalinosoitukseen. Tutkissa on esitelty uusia ominaisuuksia, kuten epäsuoran tulen ennakkovaroituskyky. Nykyaikaiset valvontatutkat poikkeavat toisistaan merkittävästi esimerkiksi järjestelmän koon ja painon tai suorituskyvyn osalta. Jokaiseen alustyyppiin ja kokoluokkaan on tarjolla lukuisia eritasoisia vaihtoehtoja. Suorituskykyisempi valvontatutka on yleensä joko huomattavasti kookkaampi tai vaihtoehtoisesti kalliimpi kuin vaatimattomamman suorituskyvyn omaava järjestelmä. Valvontatutkan valinta on aina kompromissi edellä mainittujen ominaisuuksien välillä.

Valvontatutkien kehitys tulee säilymään nopeana ja sitä tulee seurata jatkossakin tarkasti. Mielenkiintoisia tulevaisuuden tutkimuskohteita olisivat esimerkiksi stationaariset vaiheohjatut antennit ja niiden soveltuminen pienen pintataistelualuksen valvontatutkaan tai tutka-antennin sensori-integraatio.

LÄHTEET

- [1] Ronumäki, J. *Meritilannekuva – Apuna METO-viranomaisten lakisääteisten tehtävien hoitamisessa*. Pro-gradu tutkielma. Helsinki, 2008.
Maanpuolustuskorkeakoulu, merikadettikurssi 74. 89 s.
- [2] Rekkedahl, N.M. *Nykyaikainen sotataito – Sotilaallinen voima muutoksessa*. 4. uusittu painos. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, 2013. 567 s. ISBN 951-25-1734-5 (PDF).
- [3] Rautiainen, J. *Logistiikka mahdollistajana ja kohteena*. Kirjassa: Sirén, T. (toim.) *Verkostoavusteinen puolustus 2030*. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, 2009. 303 s. ISBN 978-951-25-2046-6 (PDF).
- [4] Lehmuslehti, A. (toim.) *Alueellinen puolustus 2030 – Mahdollisuudet ja edellytykset*. Kirjassa: Sirén, T. (toim.) *Verkostoavusteinen puolustus 2030*. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, 2009. 303 s. ISBN 978-951-25-2046-6 (PDF).
- [5] Rimmanen, S. *Lähialueen taistelualuskaluston ja sen suorituskyvyn kehittyminen*. Diplomityö. Helsinki, 2009. Maanpuolustuskorkeakoulu, yleisesikuntaupseerikurssi 54, merisotalinja. 119 s.
- [6] Kolehmainen, A. *Meritorjuntaohjusten torjuntamahdollisuus ohjusveneellä*. Pro-gradu tutkielma. Helsinki, 2009. Maanpuolustuskorkeakoulu, merikadettikurssi 75. 56 s.
- [7] Gripenwaldt, C-M. *Pinta-aluksen kyky havaita kohti ammuttu meritorjuntaohjus*. Esiupseerikurssin tutkielma. Helsinki, 2011. Maanpuolustuskorkeakoulu, esiupseerikurssi 63, merisotalinja. 38 s.
- [8] Puolustusvoimat. *Puolustusvoimien määritelmärekisteri*. [Viitattu 20.1.2015]
Saatavilla: PVAH-tietokanta.
- [9] Scott, R. *Picture this: 3D shipborne radars scan for new targets*. Jane's International Defence Review. Posted 8.1.2014. [viitattu 20.1.2015] Saatavissa:
<http://janes.ihs.com/CustomPages/Janes/DisplayPage.aspx?DocType=News&ItemId=+++1730904&Pubabbrev=IDR>
- [10] *Kenttäohjesääntö, yleinen osa – Puolustusjärjestelmän toiminnan perusteet*. Helsinki: puolustusvoimat, 2007. 109 s. ISBN 978-951-25-1744-2.

- [11] Kosola, J. & Solante, T. *Digitaalinen taistelukenttä - informaatioajan sotakoneen tekniikka*. 3. painos. Helsinki, 2013. Maanpuolustuskorkeakoulu, sotatekniikan laitos. 491 s. ISBN 978-951-25-2503-4.
- [12] Rissanen, A. *Tiedustelu- ja valvontatekniikan peruskurssi, sensoritekniikan osuus*. Kurssimoniste. Maanpuolustuskorkeakoulu, 2014. 40 s.
- [13] Melvin, W.L & Scheer, J. A. (toim.) *Principles of modern radar, Vol. 2: Advanced Techniques*. Edison: SciTech Publishing, 2013. 821 s. ISBN 978-1-61353-024-5 (PDF)
- [14] Van der Berg, S. & Tonnaer A. *Evolution of aesa naval radars*. In: The 8th European Conference on Antennas and Propagation 2014 (EuCAP 2014). IEEE explorer digital library.
- [15] Wolff, C. *Radartutorial.eu, Radar Basics*. [Viitattu 20.1.2015] Saatavissa: <http://www.radartutorial.eu/index.en.html>
- [16] Wikipedia. *AN/SPY-1*. [Viitattu 20.1.2015] Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/AN/SPY-1>
- [17] Herd, J. *Phased Array Radar Basics*. In: Multifunction Phased Array Radar Symposium 2. Norman Oklahoma: 2009. Saatavissa: http://www.ofcm.gov/mpar-symposium/2009/presentations/workshop/W1_Herd%20Basics.pdf
- [18] Bronk, J, Quintana, E. & Taylor, T. *UK Funding for "Captor-e" AESA radar announced – Better late than never*. Royal United Services Institute Analysis, Commentary. Posted: 15.7.2014 [viitattu 20.1.2015] Saatavissa: <https://www.rusi.org/analysis/commentary/ref:C53C54C0115349/#.VL-dKBBqOZR>
- [19] Glenting, D & Samuel, D. *Digitally Controlled Active Power Filter for AESA Radar*. Master of science thesis. Göteborg: 2013. Chalmers University of Technology. 44 s. saatavissa: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/183940/183940.pdf>
- [20] Tonnaer, A. (Thales Netherlands) *Dual axis multi beam radars*. In: International Radar Conference 2013 (Radar). IEEE explorer digital library.
- [21] Farina, A., Holbourn, P., Kinghorn, T., Timmoneri, L. (Selex-ES). *AESA Radar- Pan-Domain Multi-Function Capabilities for Future Systems*. In: Phased Array Systems & Technology, 2013 IEEE International Symposium. 2013. IEEE explorer digital library.

- [22] Airbus Defence & Space. *TRS-3D*. [Viitattu 20.1.2015] Saatavissa:
<http://northamerica.airbus-group.com/north-america/usa/Airbus-Defense-and-Space/TRS-3D/>
- [23] Jane's. *TRS-3D (AN/SPS-75)*. Jane's, C4ISR & Mission Systems: Maritime. Posted: 30.4.2014 [Viitattu 20.1.2015] Saatavissa:
<https://janes.ihs.com/CustomPages/Janes/DisplayPage.aspx?DocType=Reference&ItemId=+++1511704&Pubabbrev=JC4IM>
- [24] Saabgroup. *Sea Giraffe AMB*. 2014 [Viitattu 20.1.2015] Saatavissa:
http://www.saabgroup.com/Naval/Situational-Awareness/Multi-role-Surveillance-Radar/Sea_Giraffe_AMB/
- [25] Saabgroup. *SG AMB Technical Specifications* [Viitattu 20.1.2015] Saatavissa:
<http://www.saabgroup.com/en/Markets/Saab-USA/Naval/Sea-Giraffe-AMB2/Technical-Specifications/>
- [26] Jane's. *Sea GIRAFFE AMB (AN/SPS-77)/Sea GIRAFFE IX/Sea GIRAFFE LT/Sea GIRAFFE 4A radars*. Jane's, C4ISR & Mission Systems: Maritime. Posted: 14.11.2014 [Viitattu 20.1.2015] saatavissa:
<https://janes.ihs.com/CustomPages/Janes/DisplayPage.aspx?DocType=Reference&ItemId=+++1512850&Pubabbrev=JC4IM>
- [27] Ackerstierna, T. Senior Director, Product marketing and sales, Surface Radar Solutions (Saabgroup). Sähköpostikirjeenvaihto. Helsinki: 2015. Materiaali tutkijan hallussa.
- [28] Thales. *NS100 Dual Axis Multi-Beam Air & Surface Search Radar*. Datasheet [Viitattu 20.1.2015] Saatavissa:
https://www.thalesgroup.com/sites/default/files/asset/document/tha0053_datasheet_ns100_hr.pdf
- [29] Selex-ES. *Kronos Naval*. Datasheet. 2013. [Viitattu 20.1.2015] Saatavissa:
http://www.selex-es.com/documents/737448/18841020/body_Copia+di+mm07664_KRONOS_Naval_Radar_LQ_.pdf
- [30] Airbus Defence & Space. *TRS-4D*. [Viitattu 20.1.2015] Saatavissa:
<http://northamerica.airbus-group.com/north-america/usa/Airbus-Defense-and-Space/TRS-4D/>

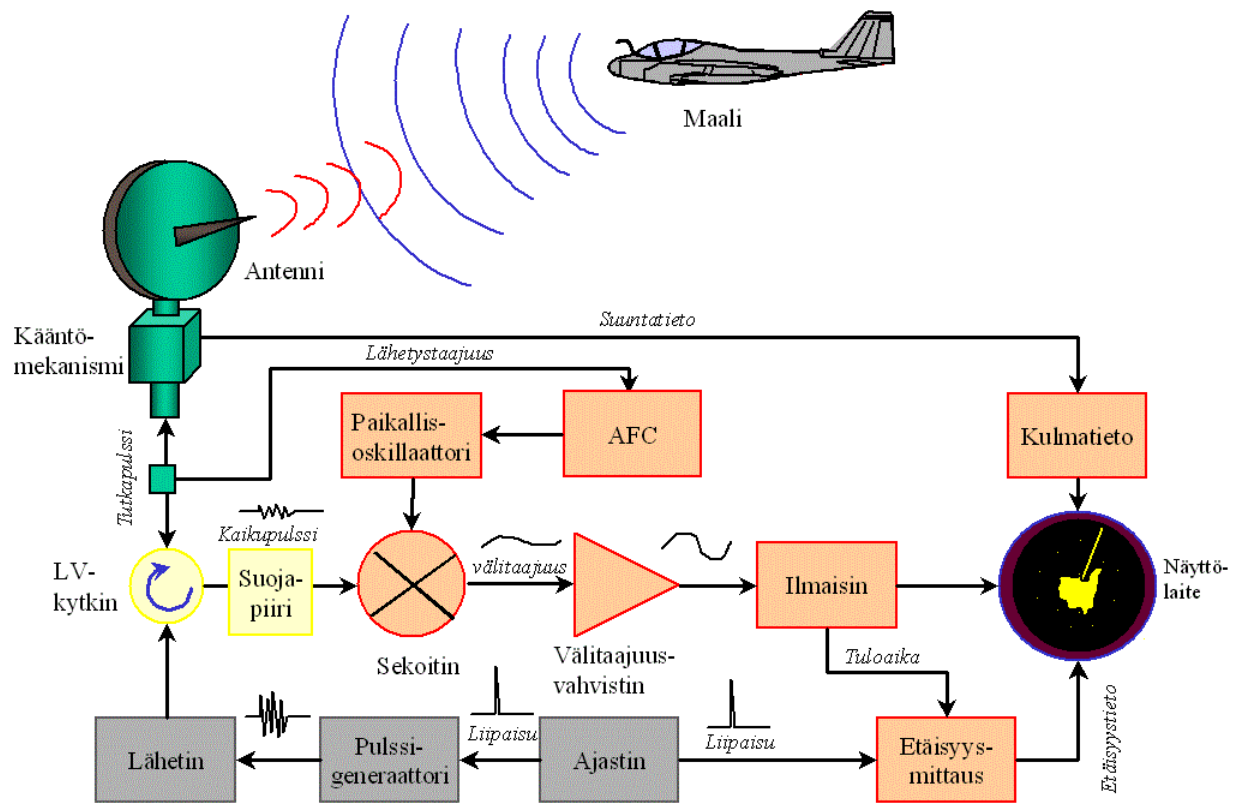
- [31] Saabgroup. *Sea Giraffe 4A*. 2014. [Viitattu 20.1.2015] Saatavissa:
http://www.saabgroup.com/en/Land/Force_Protection/Sense_and_Detect/sea-giraffe-4a/
- [32] Saabgroup. *Giraffe 4A*. 2014. [Viitattu 20.1.2015] Saatavissa:
http://www.saabgroup.com/en/Land/Force_Protection/Sense_and_Detect/GIRAFFE-4A/
- [33] Sweetman, B. *Saab's New AESA Radars*. Blog post in: ARES, Aviation week.
Posted: 13.5.2014 [Viitattu 20.1.2015] Saatavissa:
<http://aviationweek.com/blog/thats-what-i-call-confidence>

LIIITE 1

Taulukko 3. Tutkan taajuusalueiden luokittelu [12]

IEEE Standardi		NATO	
ALUE	taajuus (GHz)	ALUE	taajuus (GHz)
L	1 - 2	D	1 - 2
S	2 - 4	E	2 - 3
		F	3 - 4
C	4 - 8	G	4 - 6
		H	6 - 8
X	8 - 12	I	8 - 10

LIITE 2



Kuva 13. Tutkan lohkokaaio, jossa antenni vihreällä, lähetinpiiriin kuuluvat komponentit sinisellä ja vastaanotinpiiriin kuuluvat komponentit merkitty punaisella värillä. [10, s. 176]